

安静立位姿勢制御のフィードバック遅れ時間の推定

—ラテラルティの考慮の必要性—

Estimation of Feedback Delay during Quiet Bipedal Standing:

Is It Necessary to Consider Laterality?

藤 永 博

Hiroshi FUJINAGA

本稿は、日本発育発達学会第8回大会（平成22年3月28日・山梨大学）での研究発表「安静立位時の左右の足の圧中心動揺について—前後方向動揺の差分スペクトル解析および自己・交差相関分析の結果—」⁽¹⁾の概要をまとめたものである。

運動能力の発達の段階性および適時性⁽²⁾

運動能力⁽³⁾の成人レベルまでの発達段階については定説があり、およその年齢区分で各段階の特徴が示されている。生後4ヶ月までは反射的運動の段階、4ヶ月から1歳までは初歩的運動の段階、2歳から7歳までは基本的運動の段階、7歳以上は専門的運動（スポーツに関連する運動）の段階とされている。乳幼児期は、生涯にわたって必要とされる基本的な動作が獲得される時期である。この時期、姿勢および運動の制御は頭部から足部へ進行する。自立座位が可能になった乳児は、頭部と体幹の自発性動揺を制御することができるようになる。二つの身体分節を関連づける運動—感覚情報を協調させることを学習し、頭部制御の感覚と運動のマッピングを体幹に拡張していくと考えられる。自立立位に移行する時期は、外乱や運動の経験によって協同収縮系に新たな筋が徐々に加わり、協同収縮系が発達する。立位姿勢の維持に関与する協同収縮系の感覚へのマッピングは、運動経験と協同収縮系（筋—神経系）の構造的・機能的発達をとおしてもたらされ、成人期をとおして永続する。乳幼児期は神経系の発達にともない、反射の出現と消失、そして新たな反射の形成が見られる。それと

(1) この研究は、科学研究費補助金（基盤研究（C））「安静立位姿勢制御のフィードバック遅れ時間の推定方法に関する比較研究」の助成を受けて実施された。

(2) 藤永 博（2009）幼児の運動技能と姿勢制御系の発達について—運動遊びの志向が及ぼす影響に着目して—和歌山大学経済学会『研究年報』第13巻 pp.1-30.

(3) 本稿では運動技能（スキル）と同じ意味で用いる。

同時に随意運動の発達が見られるようになる。

幼児は1歳を過ぎる頃から二足歩行が可能になり、2歳後半から3歳になる頃には走ることに加えて、徐々に動きを意識的に調節⁽⁴⁾できるようになる。3歳頃には跳躍運動ができるようになり、4歳にかけては全身運動が多様化し、5歳頃にはより巧みな運動ができるようになる。この頃になるとリズムに合わせた運動も可能になる。6歳頃には運動能力の発達（運動発達）とともに自分の動きを思ったとおりに調節できるようになってくる。神経系だけではなく筋—神経系（協同収縮系）が発達し、筋力も増大するこの時期になると、環境との相互作用により様々な動きを習得するようになる。このような子どもの段階的運動発達を支援するためには、適切な環境を準備する必要がある。

幼児期の運動発達には適時性がある。つまり、適切な時期に適切な経験をさせないと、その後では習得に困難さが増す可能性がある。例えば、歩行は幼児にとって生活上必要で毎日繰り返すが、他の基本的な運動は機会がなければ行わない。そのような基本的な運動を5歳頃までにしっかり経験しないと、身体発育にともなう運動発達に障壁ができ、潜在的には獲得可能なはずの運動技能を実際に獲得することが困難になる。

運動発達は姿勢制御系の発達（姿勢発達）と密接に関わるという指摘がある。運動発達の各段階における平衡反応が成熟した後で次の運動は発達する。平衡反応とは、運動中、身体のバランスが崩れたときに出現する反応である。最初は伏臥位で、次に仰臥位で、さらに座位、四つ這位、最後に立位で平衡反応が出現するという。前段階の平衡反応が成熟しなければ、より高度な運動発達の段階には進めない。走るためには歩くための機能が、歩くためには立位姿勢を保持するための機能が必要となる。姿勢に関与する反射や反応は運動発達に影響を及ぼす。姿勢と運動は別々に制御されるわけではなく、緊密に統合された動的に安定な状態として発現する。姿勢と運動を制御・調節する系はそれぞれ独立したものであっても、運動課題や環境に応じてそれらは協調的に機能する。姿勢発達は、移動性技能や操作性技能の獲得に欠くことのできない過程である。姿勢発達の遅れは、運動能力の獲得の制限因子あるいは制約になりかねない。

運動発達を客観的に評価するための方法（運動能力テストなど）に関しては、これまで数多くの調査研究報告がなされている。しかし、運動能力の基礎となる姿勢の発達については、その測定評価方法に関する体系的な検討は行われていない。臨床分野で幅広く利用されている重心動揺検査の手法を健常者の姿勢発達評価に活用することはできないだろうか。

（４）本稿では調節と制御を厳密に区別していないが、前者には目的にあった状況あるいは好ましい状況を生み出すという意味合いを、後者には目的に合わない状況あるいは好ましくない状況を抑制するという意味合いをもたせている。

姿勢発達⁽⁵⁾の指標としての安静立位時足圧中心動揺

身体は多くの体節と関節と筋をもつ多回転軸系である。そのため、重力の影響下で立位姿勢を維持する際、外乱のない安静状態であっても常に間欠的で微小な動揺が生じる。この自発性姿勢動揺には身体のアラインメント（重力の影響）、筋緊張、姿勢緊張などの要因が関与する。筋緊張は、筋が伸張に対して抵抗する力である。筋緊張のメカニズムには神経系が関与するもの（伸張反射）と関与しないものがある。姿勢緊張は抗重力筋の活動の変化による。抗重力筋の活動は、視覚系、前庭系（半規管、耳石器）、体性感覚系（固有受容器、皮膚受容器、関節受容器）の入力の影響を受ける。

立位姿勢の安定性は、身体の質量中心の垂直投影点（重心）を基底面周辺の安定性限界と呼ばれる範囲内に保持する能力と定義される。質量中心は身体的全質量の中心位置と定義され、各体節質量の重みつき平均により決定される。基底面とは足底と支持面が接している範囲であり、安定性限界は基底面を変えずに身体的位置を保持できる境界面と定義される。安定性限界は固定的な境界ではなく、個々の生体力学的状態、運動課題、環境によって変化する。身体は重心が安定性限界の範囲内に保たれているとき安定とみなされる。

基底面に作用する鉛直方向の力の中心位置を足圧中心と呼ぶ。二足立位時には、各足の足圧中心はそれぞれの足底面に分かれている。したがって実際の足圧中心は両足の間にあり、それぞれの足底面に作用する力により決定される。足圧中心と重心の動きは相互に影響を及ぼしあっているが、足圧中心と重心の動揺は一致しない。足圧中心は重心が安定性限界の範囲内に留まるように、絶えず重心の周辺を動き回っている。そのため、足圧中心は重心よりも動揺周期が短く、振幅が大きい。身体平衡の維持に関与する系（姿勢調節系）、すなわち視覚系、前庭系、体性感覚系、運動系（筋－骨格筋系）およびこれらの系の働きを統合する中枢神経系は、自発性姿勢動揺、外乱あるいは運動課題にともなう姿勢の変化に対して体幹や四肢などの筋を収縮させ、足底面の圧力分布あるいは足関節トルクを変化させることによって質量中心（重心）の位置を調節している。重心動揺からは身体のみならずに関する情報が、足圧中心動揺からは姿勢制御・調節系に関する情報が得られると考えられている。⁽⁶⁾

感覚－運動系が十分に発達していない幼児は、主にフィードバックが関与しない開ループ制御系（反射系）によって立位姿勢を維持している。開ループ制御では、足圧中心は速く、大きく変動する。幼児は自発性姿勢動揺や外乱に対して、成人よりも足圧中心をバリストックに移動させて姿勢動揺を制御する。姿勢制御に関与する感覚は3歳頃までは視覚が

(5) 藤永 博(2009) 前掲書

(6) 重心動揺検査は姿勢制御系の機能を評価するために実施するものであるが、安静直立姿勢での自発性姿勢動揺に関するものと、人為的な外乱を与えた際の姿勢立て直しの動きに関するものがある。検査の簡便性や安全性などの理由から、臨床あるいは健康・スポーツ科学の領域では前者のほうがより広く用いられている。通常、重心動揺検査で記録・分析されるのは身体重心の動揺ではなく足圧中心の動揺である。足圧中心はフォースプレート等を利用して容易に測定することができる。

優位であるが、4歳頃から6歳頃にかけては体性感覚が優位となり、体性感覚フィードバックを有効に機能させる閉ループ制御系が発達する。また、この時期は感覚系の統合が進み、さらに筋の協同収縮を可能にする筋—神経系が徐々に発達する。7歳から8歳頃には開ループ制御系と閉ループ制御系の機能的・構造的カップリングや、上位中枢による反射抑制（フィードフォワード制御）が成人レベルに近づくと考えられる。この段階になると、過剰な反射性運動や不必要な筋活動は制御され、巧みな随意運動の遂行が可能となる。幼児期および学童期前半に見られる安静立位時足圧中心動揺の加齢変化は、運動発達の基盤となる姿勢制御系の発達を反映すると推察される。姿勢発達の背景には、筋反射の抑制・統合による機能的姿勢反射の発達、筋—神経系や感覚—運動系（フィードバック系・フィードフォワード系）の発達がある。これらの系の発達によって、安静立位時の自発性姿勢動揺は適切に制御されるようになり、幼児期の運動発達が実現可能となる。

足圧中心動揺の総軌跡長（平均動揺速度）や面積（例えば平均二乗偏差面積（RMSA）⁽⁷⁾）などは姿勢動揺の大きさを示す基本的な項目であるが、これらの要約統計量だけで姿勢制御系の機能を評価することはできない。足圧中心動揺の時系列あるいは周波数分析、非線形解析などを組み合わせて、初めてそれは可能になる。本研究では幼児期の特徴である機能的姿勢反射の発達（筋反射の抑制・統合）を評価するための指標を模索している。遅れランダムウォークモデルや非整数ブラウン運動モデルなどを利用して推定するフィードバック遅れ時間が有望と考えているが、そのような推定方法の一例として、stabilogram diffusion plot (SDP) 法を簡単に紹介する。

足圧中心の移動二乗平均 $\langle \Delta x^2 \rangle$ とサンプリング時間間隔 Δt の関係を図1に示す。 $\langle \Delta x^2 \rangle$ と Δt の関係は、傾きが異なる2本の直線で特徴づけられる。個々の直線の傾きは拡散係数に相当する。2本の直線の交点はcritical point (CP)と呼ばれる。サンプリング時間間隔はCPが発現する Δt_{CP} によってふたつの領域に区別される。つまり、計算された拡散係数（直線の傾き）の大きさから、(1) Δt が Δt_{CP} より小さい領域では足圧中心の動きはランダムな傾向が強く、(2) Δt が Δt_{CP} より大きい領域では足圧中心の動きは負のフィードバック制御の影響を強く受けると考えられている。⁽⁸⁾ Δt_{CP} はフィードバックの遅れ時間、すなわち姿勢制御に関与する冗長な情報を統合するための時間と解釈されている。フィードバックの遅れ時間は、必ずしも制御系の欠陥を意味するものではない。むしろ、開ループ制御系の機能性の高さ、あるいは姿勢制御系の生理的なゆらぎを許容する「機能的あそび」を反映している可能性があ

(7) Root mean square area の略で、前後 (y) 左右 (x) 方向の変位の二乗平均平方から計算される足圧動揺面積。

$$RMSA = \pi \left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2)} \right)^2 \quad N \text{はデータ数}$$

(8) SDP法の理論背景と問題点については別稿で取り上げる。

る。SDP法などによって推定されるフィードバックの遅れ時間は、標準的な重心動揺検査項目だけでは説明できない姿勢制御系機能の指標のひとつとして注目されている。SDP法によるフィードバックの遅れ時間の推定は、CPの決定方法に多くの選択肢があり、標準的な手法が確立されているとはいえない。足圧中心動揺のフィードバックの遅れ時間は、自己相関関数などからもある程度推定が可能である。種々の推定方法の信頼性、妥当性などについては今後、検証する必要がある。

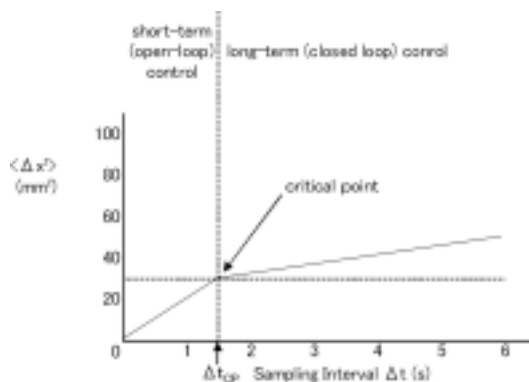


図 1

本稿で指摘したいのは遅れ時間の推定方法の問題ではなく、自発性姿勢動揺を制御する「戦略」に関わるラテラリティの問題である。足圧中心は足底面の圧力分布の中心（重みつき平均）である。左右の足の圧中心はそれぞれの足の接地面上にあるが、二足立位時の足圧中心は、左右の足圧に著しい差がないかぎり、通常は両足の圧中心のほぼ中間にある（図2）。しかし、子どもの足圧中心の測定結果をみると、左右の足の圧中心動揺が対称になっているケースはむしろ少なく、データを分析する際はラテラリティ（左右差）を考慮する必要があると考えられる。この点を指摘するために、日本発育発達学会第8回大会では、小学5年生男子64名を対象に実施された足圧中心動揺検査の結果を報告した。以下はその報告の概略である。

安静立位時の左右の足の圧中心動揺について

—前後方向動揺の差分スペクトル解析および自己・交差相関分析の結果—

方法

測定 小学5年生の男子学童野球選手64名を対象に実施された足圧中心動揺検査の結果を分析した。検査では標準的な重心動揺検査のプロトコル（日本めまい平衡学会）を用いた。足圧分布・動揺計測器はwin-pod（Medicapteurs社）を利用した。win-podの圧力センサーは、サイズ8 mmx 8 mm，厚さ0.15mm，センサー数2304個（48x48），測定有効面積40mmx40mmである。

分析 win-podが0.1秒ごとに算出する左右の足圧中心位置から前後方向動揺のパワースペクトル密度と前後方向変位（差分）の自己相関係数を計算した。また、左右の足圧中心前後方向変位の交差相関係数を計算した。これらの計算および統計解析にはSPSS 11.0Jを用いた。

結果・考察

すべての児童について、左右の足圧中心動揺に顕著な周期性は認められなかった。パワースペクトル密度は、高周波域から低周波域に向かってべき乗則に近い分布を示した。

図3は左右の圧中心動揺に比較的強い同調(連動)傾向が認められた児童の交差相関プロットの例(図2と同じ児童)である。交差相関係数が比較的大きい児童(係数が0.4以上の児童)、すなわち左右の足の前後方向動揺に比較的強い連動傾向がある児童は64名中14名であった。このグループの交差相関係数の平均値は0.46(標準偏差0.04)であった。左右どちらかの足の動揺が他方を大きく先行する例はなかった。図3の例では、左右の足に同じような自己相関が認められた(図4, 図5)。



図2 足圧分布と足圧中心動揺(左右の連動傾向が比較強い児童の例)

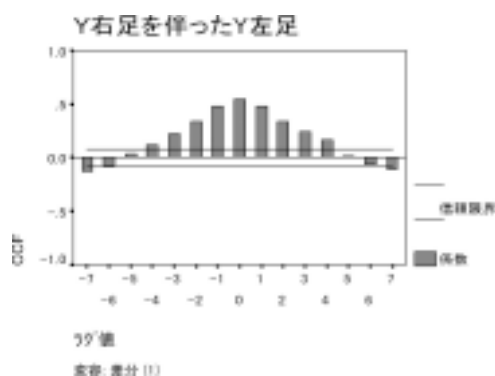


図3 交差相関プロット(左右の連動傾向が比較強く、両足に自己相関が認められた児童の例)

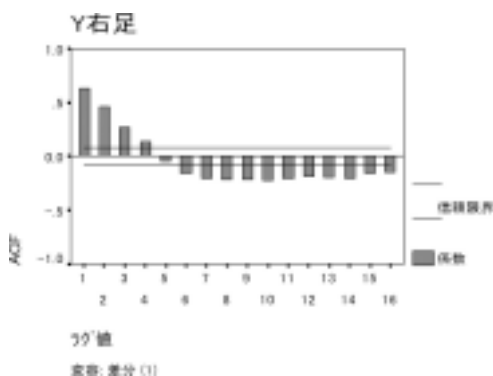


図4 図3の例の自己相関プロット(右足)

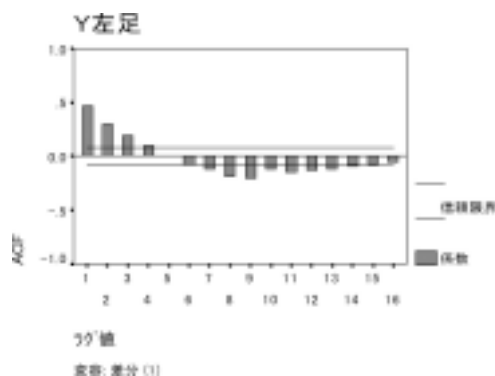


図5 図3の例の自己相関プロット(左足)

図6－図11は連動傾向が認められなかった児童の例である。接地面積、平均足圧は右足の方が大きく、自己相関も右足だけに認められた。高周波域から低周波域へのパワーの減少率は左足の方が大きく（図9、図11）、右足の圧中心動揺のほうが「ゆらぎ」がより不規則であることがわかる。⁽⁹⁾この例では、自発性姿勢動揺の制御という点では右足が優位に機能しているのは明らかであるが、左足も何らかの機能的役割を果たしていると考えられる。複雑なフィードバックループが関与する姿勢制御系のダイナミクスを理解するためには、関与する制御系を一つずつ減らしていくオープンループ解析の手法が有効である。片足立位やタンデム立位での足圧中心動揺検査をこうした視点で実施する必要がある。



図6 足圧分布と足圧中心動揺（左右の連動傾向が小さく、右足にのみ時候相関が認められた児童の例）

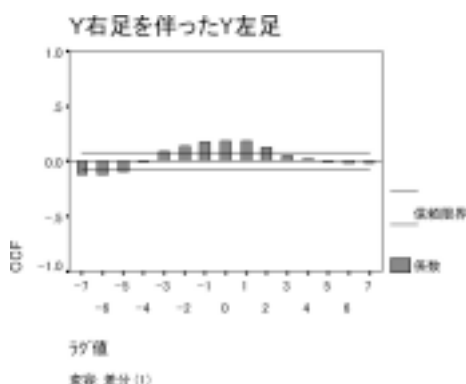


図7 図6の例の交差相関プロット

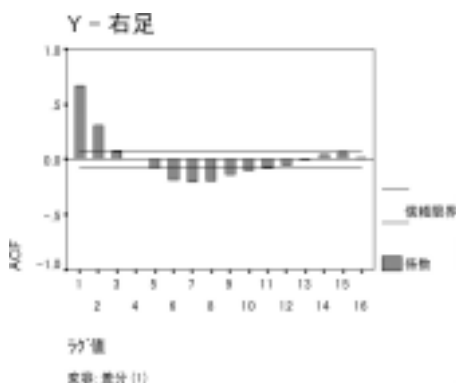


図8 図6の例の自己相関プロット（右足）

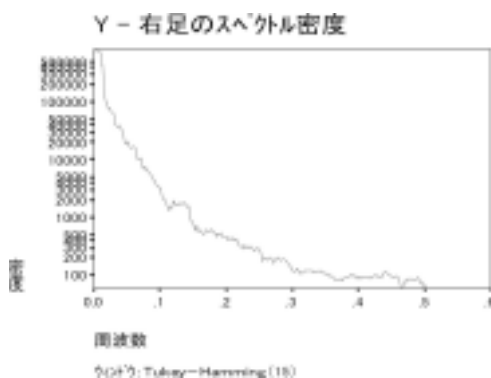


図9 図6の例のスペクトル密度（右足）

（9）足圧中心動揺の「ゆらぎ」の解釈についても別稿で取り上げる。

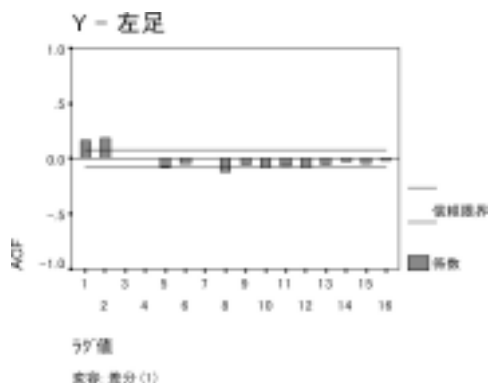


図10 図6の例の自己相関プロット（左足）

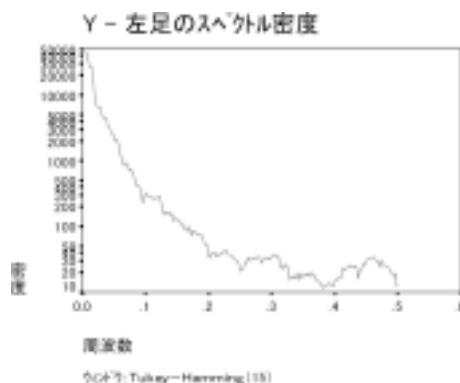


図11 図6の例のスペクトル密度（左足）

自己相関が両足に認められた児童は23名（グループ1）、片足のみに認められた児童は32名（グループ2）、自己相関が認められなかった児童は9名（グループ3）であった。グループ3の中には、交差相関が比較的高い児童も含まれている。このグループの動揺面積（RMSA）の平均値は他のグループよりも有意に低かった。グループ1の児童の例（図4、図5）ではゼロクロスは左右の足とも5期（0.5秒）である。ゼロクロスは足圧中心動揺のフィードバック遅れ時間の指標の一つである。ゼロクロスが0.5秒ということは、ある時点での動揺をフィードバックして修正するのに0.5秒を要することを意味する。つまり、ある時点で足圧中心が前方に変位するとその影響は約0.5秒間続くことになる。⁽¹¹⁾

グループ1のゼロクロスの平均は、右足2.7期（0.27秒）、左足3.0期（0.3秒）⁽¹²⁾で、左右の足のゼロクロスが2期（0.2秒）以上異なるグループ1の児童は23名中14名であった。これらの児童とグループ2の児童を合わせ、前後方向の動揺に関与するフィードバック制御にラテラルリティが存在すると考えられる児童は64名中46名（約72%）であった。

フィードバック遅れ時間をもとに姿勢発達について言及する場合は、ラテラルリティを考慮する必要がある。安静立位時の自発性姿勢動揺制御では、姿勢制御系（運動系）の「効果器」である左右の足が、必ずしも同じような機能をはたすわけではない。二足が同調（連動）あるいは「協応」して動揺制御にあたる場合もあれば、独立して動揺制御をする場合もある。これらは、状況に応じた姿勢制御戦略の使い分けかもしれないし、立位姿勢の歪みに原因するかもしれない。

(10) 自己相関係数が最初にゼロクロスするラグ値（ゼロクロスしない場合は最初に極小値をとるラグ値）

(11) この時間が短ければ短いほど制御系が優れているというわけではない。生体内の制御系の「機能的あそび」がより効果的な制御を可能にするという考え方もある（本稿p.4）。

(12) 遅れランダムウォークモデルを利用して計算される姿勢制御の遅れ時間は300ms～700msである。

今後の課題

これまでの足圧中心動揺検査では、ラテラルリティを無視して両足の平均圧中心の動揺を分析してきたが、ラテラルリティを考慮した検査方法の検討とラテラルリティの本質の見極めが必要ではないか。今後の研究では次の点を明らかにしていきたい。安静立位時の自発性姿勢動揺制御に関わるラテラルリティは、

- (1) 何歳ころから顕著になるか。
- (2) 幼児期の運動遊びや学童期のスポーツ活動に影響されるか。
- (3) 姿勢制御戦略か、あるいは立位姿勢の歪みか。